

Научная статья
УДК 504+551.465
EDN NVHRIB

Поле концентрации общего взвешенного вещества антропогенной природы у южного берега Герակлейского полуострова (Крым)

П. Д. Ломакин *, А. И. Чепыженко

*Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН»,
Севастополь, Россия*

** e-mail: p_lomakin@mail.ru*

Аннотация

На базе данных серии экспедиций, проведенных в 2008–2019 гг., проанализированы особенности структуры поля концентрации общего взвешенного вещества на участках подводных выпусков городских стоков. Оценен линейный масштаб их влияния. Рассмотрены закономерности распространения сточных хозяйственно-бытовых вод при трех типах фоновой стратификации водной толщи. Выявлено, что на исследуемых прибрежных участках поле анализируемой величины крайне неоднородно. На поверхности моря на фоне низкой природной концентрации наблюдались отдельные пятна с концентрацией в десятки раз выше окружающего фона. Основная масса взвеси в районе выпусков накапливалась в слое 0–7 м. В подповерхностных водах в структуре рассматриваемого поля отмечены локальные максимумы, а также обособленные линзы с пониженной соленостью. Антропогенная взвесь распространялась на расстояние 0.4–1.5 мили от мест выпуска. Подтверждены известные закономерности распространения сточных вод из глубоководных выпусков, определяемые стратификацией водной толщи: свободное проникновение к поверхности в условиях однородной среды, преимущественно горизонтальный перенос при наличии сезонного термоклина и выход на поверхность моря в ситуации ветрового апвеллинга на фоне развитого сезонного термоклина.

Ключевые слова: общее взвешенное вещество, температура, соленость, антропогенное воздействие, Герակлейский полуостров, Черное море

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № FNNN-2021-0005 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей».

Для цитирования: Ломакин П. Д., Чепыженко А. И. Поле концентрации общего взвешенного вещества антропогенной природы у южного берега Герակлейского полуострова (Крым) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 1. С. 68–81. EDN NVHRIB.

© Ломакин П. Д., Чепыженко А. И., 2024



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Field of Total Suspended Matter Concentration of Anthropogenic Nature at the Southern Coast of the Heracleean Peninsula (Crimea)

P. D. Lomakin, A. I. Chepyzhenko

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

* e-mail: p_lomakin@mail.ru

Abstract

Based on the data of a series of expeditions conducted in 2008–2019, the paper analyzes features of the structure of the total suspended matter concentration field in the areas of underwater discharge outlets of urban wastewaters. The linear scale of their influence was estimated. The regularities of domestic wastewaters distribution were considered for three types of background stratification of the water column. It was revealed that the field of the analyzed value was extremely heterogeneous in the studied coastal areas. At the sea surface, against the background of low natural concentration, individual spots were observed with a concentration ten times higher than the surrounding background. The main mass of suspended matter in the outlet area was accumulating in the 0–7 m layer. In the subsurface waters, the structure of the field under consideration shows local maxima, as well as isolated lenses with low salinity. The anthropogenic suspension spread to a distance of 0.4–1.5 miles from the discharge sites. The paper confirms the known regularities of the distribution of wastewaters from deep-sea outlets. These regularities are determined by the water column stratification and are as follows: free penetration to the surface in a homogeneous environment, predominantly horizontal transport in the presence of a seasonal thermocline, and penetrate to the sea surface in a situation of wind upwelling against a developed seasonal thermocline.

Key words: total suspended matter, temperature, salinity, anthropogenic impact, Heracleean Peninsula, Black Sea

Acknowledgements: The work was performed under state assignment of Marine Hydrophysical Institute of RAS on topic FNNN-2021-0005 “Complex interdisciplinary research of oceanologic processes, which determine functioning and evolution of the Black and Azov Sea coastal ecosystems”.

For citation: Lomakin, P.D. and Chepyzhenko, A.I., 2024. Field of Total Suspended Matter Concentration of Anthropogenic Nature at the Southern Coast of the Heracleean Peninsula (Crimea). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 68–81.

Введение

С 2016 г. в Севастопольском регионе, вблизи источников загрязнения в бухтах и на открытых участках взморья, проводится гидролого-гидрохимический мониторинг состояния морских вод, который включает исследование гидродинамических факторов, определяющих перенос и накопление взвеси и загрязняющих веществ.

Первые результаты этих исследований с комплексной оценкой расхода источников и уровня загрязнения морской среды, анализом гидрофизических процессов и гидрохимических параметров опубликованы в статье [1]. В частности, они касаются основных двух наиболее загрязненных открытых участков

Севастопольского взморья: 1 – у входа в Балаклавскую бухту, 2 – у юго-западного участка берега Гераклейского полуострова (район м. Фиолент), куда выведены коллекторы сточных хозяйственно-бытовых вод г. Балаклавы и г. Севастополя (рис. 1).

В статье рассматривается структура поля содержания общего взвешенного вещества (ОВВ) на данных участках.

Выбранный параметр относят к наиболее информативным показателям загрязнения вод прибрежных акваторий, а структура поля концентрации данного вещества содержит информацию об источниках антропогенной нагрузки, степени их влияния на водную среду, траекториях распространения загрязняющих веществ, местах их аккумуляции и рассеяния [2].

Активные океанологические исследования поля содержания ОВВ в океанах, морях и пресноводных водоемах были начаты примерно 30 лет назад. Тогда в ряде зарубежных стран были изобретены основанные на оптическом принципе зондирующие комплексы (*Midas CTD+Valeport Ltd*, Великобритания, *EXO2 Multiparameter Sonde*, *YSI Incorporated*, США, *CTD90M – Probe Sea & Sun Technology GmbH*, Германия, *Metrec•XL AML Oceanographic*, *CANAD*, А). Они оперативно *in situ* определяют концентрацию ОВВ с хорошим пространственным разрешением. Точность измерения содержания этого вещества возросла на порядок по сравнению с применявшимся ранее методом выпаривания и последующего взвешивания сухого остатка в отобранных пробах воды.

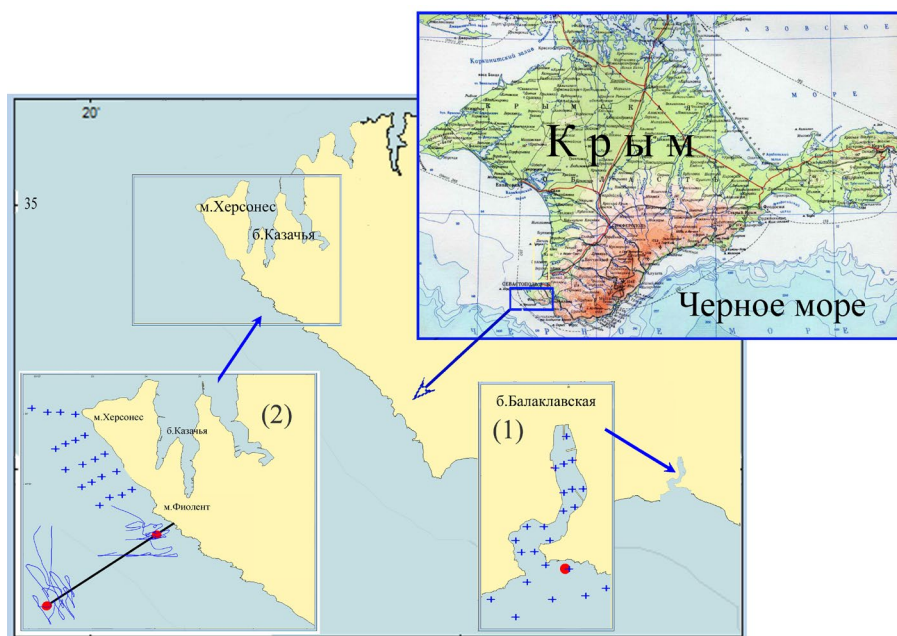


Рис. 1. Исследуемые участки на карте южного берега Гераклейского полуострова. Красными кружками обозначены коллекторы сточных хозяйственно-бытовых вод

Fig. 1. The studied areas on the map of the southern coast of the Heracleian Peninsula. The red dots are for municipal waste-water sewers

С начала текущего столетия аналогичный зонд стал использоваться в практике прибрежных экспедиционных исследований Морского гидрофизического института, в частности при исследовании распространения сточных вод из подводных канализационных выпусков в сева­стопольском регионе.

Цели статьи:

- выявить признаки антропогенного воздействия на водную среду в структуре поля концентрации ОВВ и термохалинного поля на двух участках сева­стопольского взморья, где расположены подводные выпуски сточных хозяй­ственно-бытовых вод г. Балаклавы и г. Севастополя;
- оценить горизонтальный и вертикальный масштабы антропогенного воздействия каждого из источников на окружающую среду;
- рассмотреть влияние фоновой стратификации на характер распростра­нения сточных вод из придонного слоя к поверхности моря;
- сопоставить результат с полученными ранее на основе других методов известными закономерностями распространения канализационных стоков из глубоководных выпусков в зависимости от стратификации водной толщи.

Исходные данные и методы исследования

Для анализа использованы материалы семи комплексных экспедиций, проведенных Морским гидрофизическим институтом (МГИ) и Институтом биологии южных морей (ИнБЮМ) в 2008–2019 гг.

Распределение исходной информации по районам и во времени показано в таблице. Детали и особенности конкретных съемок приведены в тексте статьи.

Данные экспедиционных исследований с фиксацией содержания ОВВ в анализируемых районах Севастопольского взморья

Data from expeditions with recording the total suspended matter content in the analyzed Sevastopol coastal areas

Район / Area	Организация / Organization	Дата съемки, участок акватории / Date of survey, site of water area
1	ИнБЮМ / IBSS	09.05.2008, Балаклавская б. + взморье / 9 May 2008, Balakalava Bay + coastal area
		14.04.2010, Балаклавская б. + взморье / 14 April 2010, Balakalava Bay + coastal area
	МГИ / МНИ	29.05.2012, Балаклавская б. + взморье / 29 May 2012, Balakalava Bay + coastal area
		06.06.2012, Балаклавская б. + взморье / 6 June 2012, Balakalava Bay + coastal area
2	МГИ / МНИ	27–28.05.2016, взморье * / 27–28 May 2016, coastal area *
		12–13.09.2016, взморье * / 12–13 September 2016, coastal area *
		23.08.2019, взморье / 23 August 2019, coastal area

* На ходу судна.

* The ship was underway.

Вся анализируемая информация получена с помощью двух приборов. Погружной автономный гидробиофизический мультипараметрический оптический зонд «Кондор»¹⁾ («НПП «Аквастандарт», ТУ 431230-006-00241904-2015; код ТН ВЭД ЕАЭС 9027 50 000 0; Сертификат ЕАЭС N RU Д-РУ.ЭМ03.А.00096/19) применялся в ходе стандартных полигонных океанологических съемок. В съемках на ходу судна использовался мутномер-турбидиметр, который входит в проточный комплекс попутных исследований МГИ (таблица).

В ходе каждого зондирования с дискретностью по глубине 0.1 м синхронно (*in situ*) фиксировались концентрация ОВВ, температура и соленость. Точность определения указанных величин равна соответственно ± 0.2 мг/л, ± 0.01 °С, ± 0.05 ЕПС.

В 1970–1980-е гг. сотрудники Института биологии южных морей НАНУ под руководством известного океанолога профессора В. И. Заца провели комплексные экспериментальные и теоретические исследования процессов самоочищения и распространения сточных вод из канализационных выпусков в Черном море. Результаты этих исследований обобщены в монографиях [3, 4]. Согласно этим источникам, коллекторы глубоководных выпусков следует размещать под пикноклином (термоклин). Данный слой препятствует подъему разбавленных канализационных стоков к поверхности моря и обеспечивает преимущественно горизонтальное их распространение.

В книге [4] показано, что у берегов Крыма подобная схема хорошо работает в теплые месяцы года в условиях резко стратифицированной водной толщи. В холодное полугодие, когда вертикальная стратификация отсутствует, факелы сточных вод свободно поднимаются к поверхности моря. Отдельно рассмотрены ситуации апвеллингов в теплый сезон года, которые ослабляют вертикальную стратификацию водной толщи и при которых факелы сточных вод проникают сквозь сезонный термоклин к поверхности с глубины 50–75 м.

Указанный результат был получен путем отслеживания на поверхности моря перемещения и трансформации пятен родамина, которым окрашивались сточные воды. Распространение загрязнителей в толще вод из точечного коллектора рассмотрено на базе методов численного моделирования.

Для решения подобной задачи мы использовали другой метод, основанный на анализе структуры поля концентрации ОВВ и сведений о фоновой стратификации термохалинного поля.

Высокая точность и дискретность по вертикали имеющихся в нашем распоряжении эмпирических данных позволили проследить распространение канализационных стоков из рассматриваемых глубоководных выпусков в каждой из отмеченных выше ситуаций: при отсутствии термоклина, при наличии развитого термоклина и в условиях ветрового апвеллинга на фоне развитого термоклина.

До настоящего времени не установлена ПДК содержания ОВВ как численного показателя загрязнения водной среды. Поэтому для оценки значимости антропогенной составляющей в поле концентрации этого вещества его

¹⁾ URL: <http://ecodevice.com.ru/ecodevice-catalogue/multiturbidimeter-kondor> (дата обращения: 12.02.2024).

фактическое содержание сравнивали с концентрацией, свойственной природной среде – водам с незначительной антропогенной составляющей ОВВ.

По результатам анализа материалов многочисленных экспедиций мы установили, что в водах Севастопольского региона в слое 0–30 м содержание ОВВ изменяется в широком диапазоне 0.2–19.0 мг/л, а структуре фактического поля данного вещества в бухтах и на открытых участках взморья свойственна пятнистость, обусловленная наличием локальных максимумов антропогенной природы. Отфильтровав соответствующие экстремумы концентрации из фактических полей, мы пришли к выводу, что концентрация в 0.8 мг/л отвечает среде с минимальной антропогенной составляющей ОВВ [5–7].

Это значение, условно принятое в качестве природной нормы содержания данного вещества в водах Севастопольского региона, использовано как критерий для определения участков, не испытывающих антропогенного влияния.

Признаки присутствия антропогенной (из канализационных стоков) взвеси – неоднородности в поле концентрации ОВВ в виде пятен (на плоскости) или линз (в пространстве) с концентрацией ОВВ более 0.8 мг/л. Иногда эти воды в виде локальных минимумов проявлялись в поле солёности.

По расположению неоднородностей с концентрацией ОВВ более 0.8 мг/л и их особым халинным признакам были выявлены участки акватории, подверженные антропогенной нагрузке, и оценен линейный масштаб влияния рассматриваемых выпусков сточных вод.

Для анализа атмосферной синоптической ситуации и погодных условий, сопровождавших экспедиционные исследования, были использованы синоптические карты сайта Гидрометцентра *Wetterzentrale* (URL: <http://old.wetterzentrale.de/topkarten/fsreaur.html>). Данные о погоде взяты с сайта http://gp5.am/Погода_на_Херсонесском_маяке.

Результаты и обсуждение

Рассмотрим структуру поля концентрации ОВВ в условиях различной фоновой стратификации на прибрежных участках расположения коллекторов сточных вод г. Балаклавы и г. Севастополя (рис. 1).

Район 1 – Балаклавская бухта и прилегающий участок взморья

Основной источник загрязнения этого района – коллектор сточных вод г. Балаклавы, расположенный на подходах к бухте у юго-восточного берега на расстоянии 55 м от уреза воды на глубине 9 м [1] (рис. 1).

Верхняя граница сезонного пикноклина (термоклина) в этом районе моря в среднем залегает на глубине около 15 м [8], что создает благоприятные условия для свободного подъема загрязненных вод из придонных горизонтов и выхода их на поверхность в течение всего года.

Этот эффект подтверждают результаты пяти океанологических съемок Балаклавской бухты и смежной акватории моря, которые были выполнены сотрудниками ИнБЮМ в 2000–2006 гг. в ходе мониторинговых исследований этой бухты и прилегающего залива Мегало-Яло [8].

Анализ материалов экспедиций показал, что структура поля концентрации ОВВ обладает характерными свойствами, которые качественно не изменились от съемки к съемке.

В районе выпуска наблюдался локальный максимум содержания этого вещества, который изменялся в интервале 7.1–18.6 мг/л. При этом придонный максимум был менее значительным и примерно в 1.5–3 раза превышал природную норму. Вся толща вод содержала антропогенную взвесь, которая в основном концентрировалась в верхнем слое толщиной 3–7 м. Горизонтальный масштаб линзы загрязненных вод на поверхности моря равнялся 0.4–0.6 мили. Согласно гидрохимическим исследованиям, при ветре южной четверти, трансформированные сточные воды из района выпуска проникали в куттовую часть бухты.

На рис. 2 проиллюстрирована ситуация максимального загрязнения рассматриваемого участка, отмеченная в августе 2006 г. В поверхностном слое моря концентрация ОВВ достигала 18.6 мг/л, у дна – 2.8 мг/л, а горизонтальный масштаб линзы загрязненных вод равнялся примерно 0.6 мили. Основное количество исследуемого вещества было сосредоточено в слое 0–5 м.

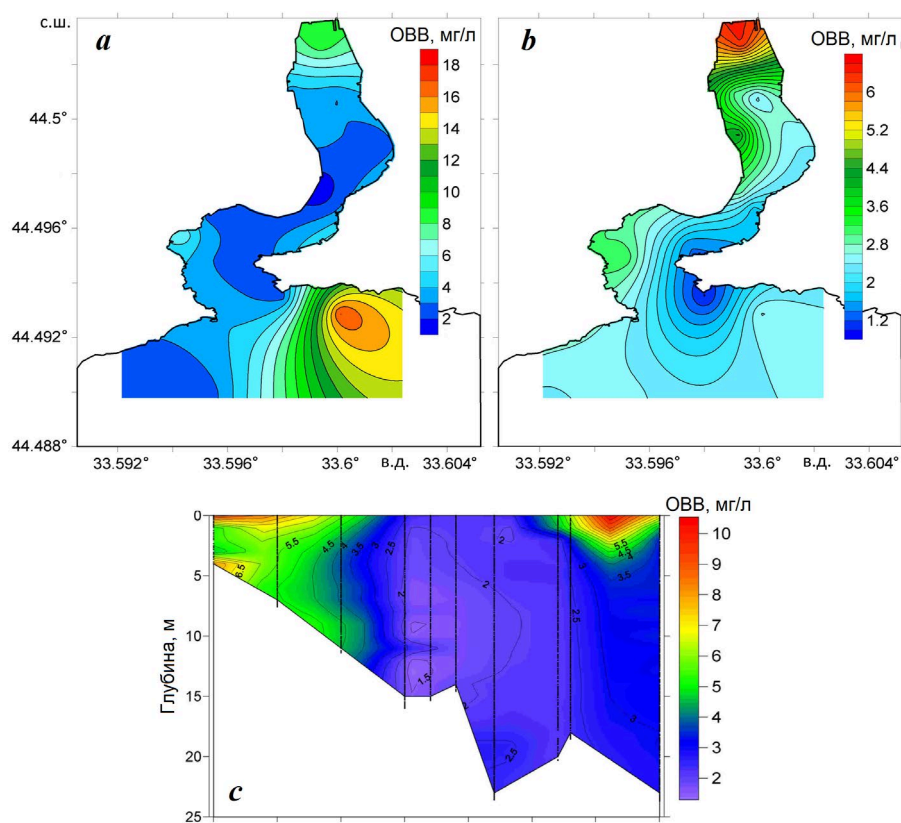


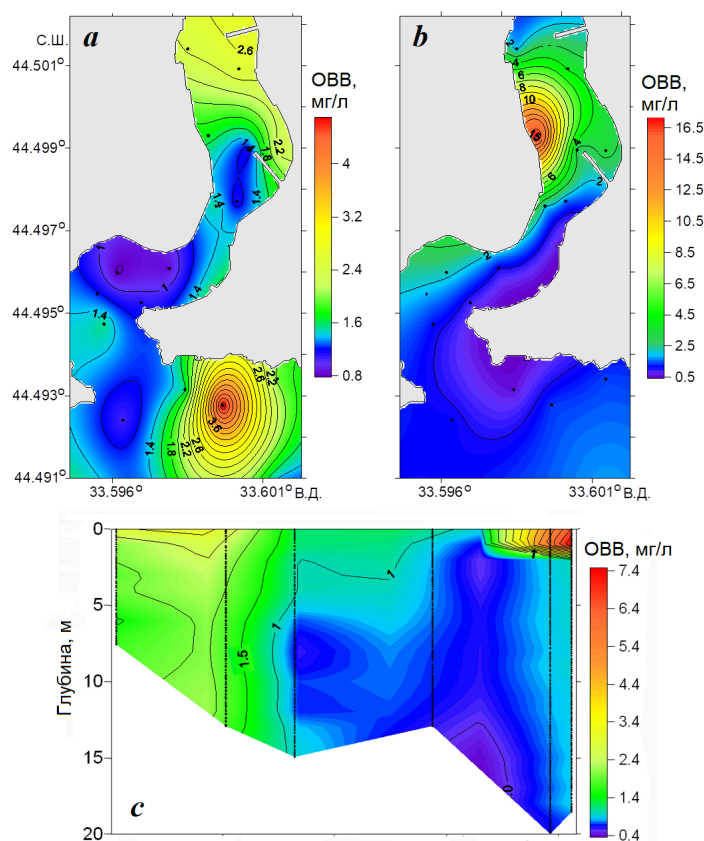
Рис. 2. Концентрация ОВВ в районе Балаклавской бухты в августе 2006 г.: *a* – в поверхностном слое; *b* – у дна; *c* – на продольном разрезе через бухту [8]

Fig. 2. TSM concentration in the area of Balaklava Bay in August 2006: *a* – in the surface layer; *b* – near the bottom; *c* – at the longitudinal transect of the bay [8]

Анализ данных последующих экспедиций, проведенных в 2008–2012 гг. (таблица), показал те же самые основные свойства структуры поля содержания исследуемого вещества, которые были выявлены ранее, а также его значительную концентрацию, на порядок превышающую природную норму (рис. 3). Это указывает на значительный расход и стабильность параметров рассматриваемого источника загрязнения и степень его влияния на водную среду.

Район выпуска сточных вод г. Балаклавы выделяется максимальной концентрацией ОБВ антропогенной природы по сравнению с другими открытыми участками побережья и бухтами Севастопольского региона.

Отклик водной среды на локальное антропогенное воздействие на подходах к Балаклавской бухте также отмечен в поле солености. В районе выпуска, в центре линзы с максимальной концентрацией ОБВ, наблюдалось заметное распреснение поверхностного слоя вод в виде локального минимума солености. Соленость в точке этого экстремума была на 0.2–0.5 ЕПС ниже окружающего фона.



Р и с . 3 . Концентрация ОБВ в районе Балаклавской бухты в апреле 2010 г.: *a* – в поверхностном слое; *b* – у дна; *c* – на продольном разрезе через бухту

F i g . 3 . TSM concentration in the area of Balaklava Bay in April 2010: *a* – in the surface layer; *b* – near the bottom; *c* – at the longitudinal transect of the bay

Для сравнения, в области природного Георгиевского источника субмаринной разгрузки, находящегося у юго-западного берега Балаклавской бухты, эффект распреснения в десятки раз меньше (аналогичный экстремум не более 0.02 ЕПС) [8], что свидетельствует о значимости выпуска сточных вод г. Балаклавы как фактора загрязнения водной среды.

Район 2 – акватория у юго-западного берега Гераклейского полуострова, где расположены очистные сооружения «Южные»

Отметим особенность структуры вод данной акватории – здесь на глубинах от 50 до 100 м расположен постоянный (основной) пикноклин, соответствующий основному черноморскому галоклину. Известный источник загрязнения этого участка взморья – сточные хозяйственно-бытовые воды очистных сооружений «Южные», г. Севастополь [1]. Оголовок трубопровода этих сооружений расположен на расстоянии ~3 км от берега на глубине 88 м. В 2014 г. в подводном трубопроводе на расстоянии ~700 м от берега на глубине 34–37 м образовалась протечка, которая превратилась в значимый источник антропогенной взвеси [1].

Распространение сточных вод повышенной мутности из протечки хорошо прослеживается на спутниковых снимках в видимом диапазоне (рис. 4).

В мае и сентябре 2016 г. в районе очистных сооружений «Южные» были проведены две экспедиции с фиксацией содержания ОВВ на ходу судна (таблица). Измерения концентрации ОВВ выполнялись в установленной на борту судна проточной системе, куда был помещен мутномер-турбидиметр. В районе трубы судно передвигалось нерегулярными галсами. На наиболее загрязненных участках, которые на поверхности моря визуальнo выделялись в виде пятен

повышенной мутности, расстояние между соседними галсами сокращалось.

В мае 2016 г. были исследованы участки в окрестности обоих выпусков (рис. 1; рис. 5, а). В сентябре этого года изучался только участок ближнего к берегу выпуска, от пляжной зоны до половины длины трубопровода сточных вод (рис. 5, б).

В мае 2016 г. работы велись в жаркую маловетреную погоду, которая определялась антициклональным малоградиентным полем приземного атмосферного давления. Съемка была выполнена в начале теплого сезона, когда черноморский термоклин (пикноклин) еще не сформирован и вертикальный обмен не ограничен этим элементом стратификации.

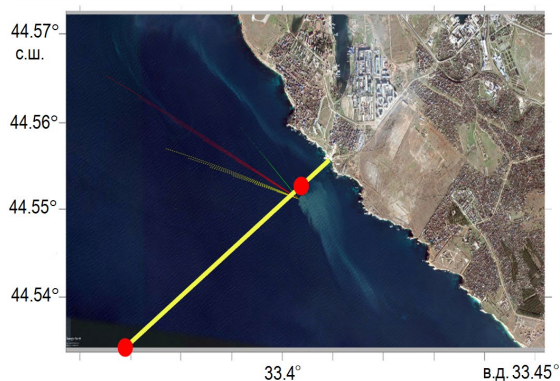
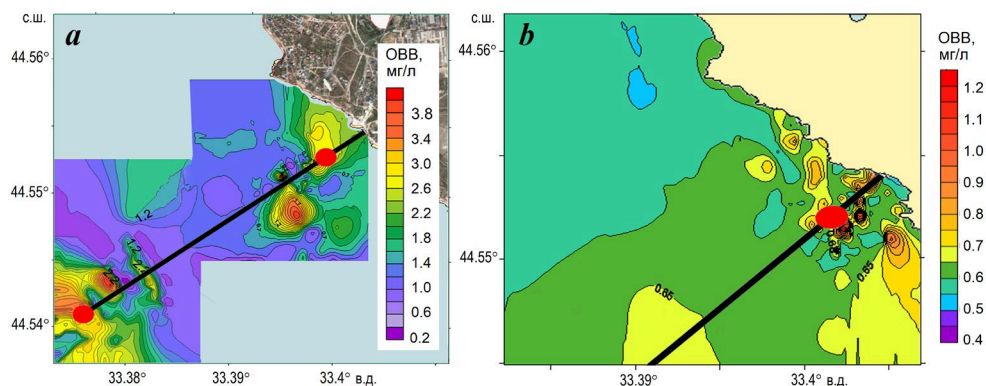


Рис. 4. Спутниковый снимок (URL: http://dvs.net.ru/SWCrimea/stoki_ru.shtml) участка рассматриваемой акватории с нанесенной схемой трубопровода очистных сооружений «Южные». Красными кружками обозначены выпуски сточных вод

Fig. 4. Satellite image (URL: http://dvs.net.ru/SWCrimea/stoki_ru.shtml) of the studied water area with a scheme of a pipeline of sewage facilities *Yuzhnye*. The red dots are for discharge outlets



Р и с . 5 . Концентрация ОВВ в слое 0–1 м в районе 2 в мае (а) и сентябре (b) 2016 г. Черной линией обозначен трубопровод с выпусками (кружки красного цвета) сточных вод

F i g . 5 . TSM Concentration in the 0–1 m layer in Area 2 in May (a) and September (b) 2016. The black line is for the pipeline with discharge outlets (red dots)

Анализ экспериментальных данных показал присутствие значительного количества антропогенной взвеси в верхнем слое вод. На фоне низкой (0.2–0.4 мг/л), типичной для открытой части Черного моря концентрации ОВВ антропогенная взвесь от двух выпусков, концентрация которой в разы и на порядок превосходила фоновые значения, наблюдалась на преобладающей части акватории. Над обоими выпусками были обнаружены локальные максимумы концентрации исследуемого вещества 4.0–4.2 мг/л. От ближнего к берегу выпуска антропогенная взвесь в виде пятен диаметром около 100 м распространялась на мелководье. В районе мористого выпуска наблюдались обширные пятна диаметром до ~200 м с концентрацией ОВВ, в 3–5 раз превышавшей природную норму.

Съемка 12–13 сентября 2016 г. проводилась при ясной маловетреной (ветер переменных направлений скоростью 2–3 м/с) погоде, которая определялась малоградиентным полем приземного атмосферного давления. Сентябрьская съемка была проведена в условиях развитой вертикальной стратификации поля плотности, которая типична для Черного моря в конце летнего сезона. Результат этой съемки подтвердил значимую экранирующую роль сезонного термоклина, препятствующего распространению факела сточных вод из придонных горизонтов в верхний слой моря.

На преобладающей части исследуемой акватории содержание ОВВ (0.4–0.8 мг/л) соответствовало природной норме. Лишь в прибрежной зоне, на участке ближнего выпуска сточных вод, были обнаружены отдельные небольшие пятна диаметром 10–50 м с концентрацией ОВВ 1.0–1.2 мг/л, что примерно в четыре раза ниже концентрации, зафиксированной майской съемкой (рис. 5, b).

В августе 2019 г. на полигоне, располагавшемся в полумиле к северо-западу от трубопровода очистных сооружений «Южные», в условиях сильного сгонного северо-восточного ветра сотрудники МГИ провели комплексную океанологическую съемку (таблица, рис. 1). Этот удачный эксперимент

позволил получить представление об особенностях структуры вод и распространении ОВВ от реальных источников загрязнения в ситуации апвеллинга и максимально стратифицированной водной толщи.

На исследуемом участке взморья наблюдался развитый сезонный термоклин. Его верхняя граница располагалась на глубине 7–11 м и была приподнята у берега, вертикальный градиент в термоклине (по модулю) превышал 1 °С/м.

Очаг апвеллинга на поверхности моря хорошо прослеживался в поле температуры и концентрации ОВВ в виде вытянутого вдоль берега минимума этих величин: 21.6–22.1 °С и 0.4–0.8 мг/л (рис. 6, *a, b*).

Несмотря на наличие хорошо выраженного сезонного термоклина, препятствовавшего вертикальному обмену, антропогенная взвесь, проникающая сквозь этот экранирующий слой в системе восходящей циркуляции апвеллинга, была обнаружена в верхнем слое вод почти на всей акватории полигона. Повсеместно в исследуемом районе, за исключением наиболее удаленных от трубопровода очистных сооружений «Южные» северо-западных участков, концентрация ОВВ превышала природную норму и изменялась в интервале 0.8–2.6 мг/л.

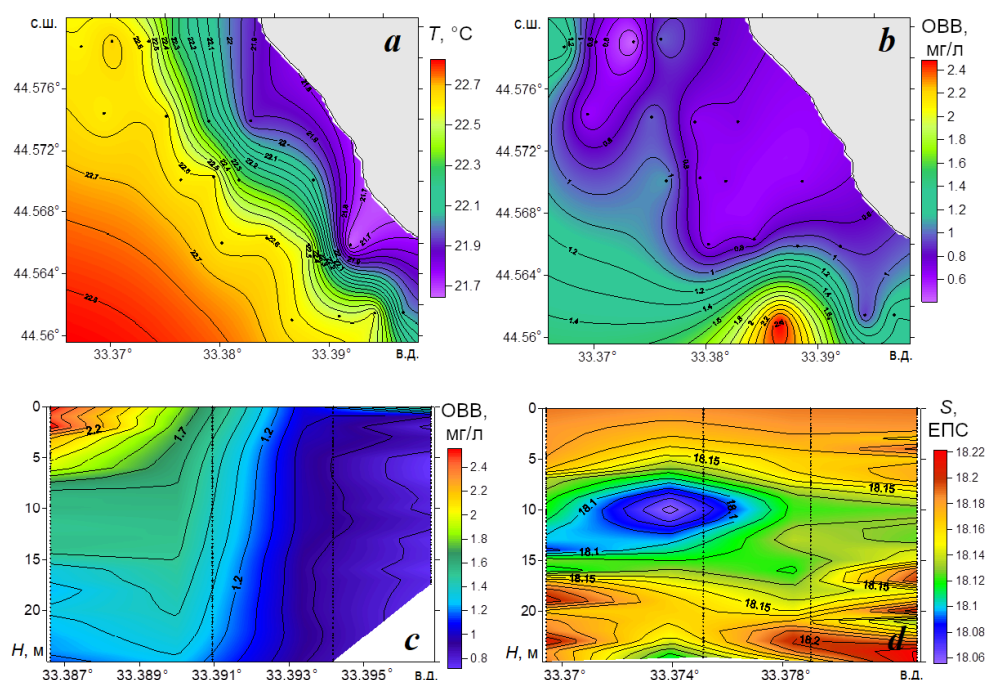


Рис. 6. Распределение гидрофизических элементов в августе 2019 г.: температуры (*a*) и концентрации ОВВ (*b*) в поверхностном слое моря; концентрации ОВВ (*c*) и солёности (*d*) на разрезах, ориентированных по нормали к берегу

Fig. 6. Distribution of hydrophysical parameters in August 2019: temperature, °C (*a*) and TSM concentration, mg/L (*b*); TSM concentration, mg/L (*c*) and salinity, PSU (*d*) at transects normal to the coast

В южной части полигона в непосредственной близости к трубе зафиксирован фрагмент линзы с вертикальным масштабом 3–5 м и максимальным содержанием ОВВ 2.4–2.6 мг/л. Антропогенная взвесь наблюдалась в верхнем слое вод на акватории с линейным размером около 1.0–1.5 миль (рис. 6, *b, c*).

Отклик на антропогенное вмешательство в состояние водной среды на исследуемом участке взморья отчетливо отражен в структуре халинного поля. Вертикальная структура вышедших к поверхности моря трансформированных сточных вод имела признаки антропогенного воздействия. Они особенно ярко проявились в стратификации поля солености в подповерхностном слое 5–20 м в виде неоднородностей, которых не должно быть в незагрязненной водной среде.

На окружающем фоне эти образования были представлены обособленными линзами с вертикальным размером 3–10 м и пониженной на 0.05–0.2 ЕПС соленостью (рис. 6, *d*).

Отметим, что следы проявлений сброса сточных вод на поверхности моря в Севастопольском регионе также обнаружены на основе анализа данных высокого пространственного разрешения со спутников *Landsat8* и *Sentinel1* [10, 11].

Результаты настоящего исследования, касающиеся особенностей распространения взвешенного вещества из подводных выпусков сточных хозяйственно-бытовых вод г. Балаклавы и г. Севастополя при различной стратификации водной толщи, соответствуют основным закономерностям распространения канализационных стоков из подводных выпусков у берегов Крыма, которые были выявлены авторами монографий [3, 4].

Следует отметить, что указанные авторы исследовали распространение искусственного красителя, тогда как в нашем случае рассматривается ОВВ – параметр фактического состояния водной среды. Это два разных вещества, и каждое из них могло по-разному распространяться в условиях одного и того же типа фоновой стратификации. Обнаруженное сходство результатов определяет возможность применения рассмотренного в настоящей статье метода для исследования распространения канализационных стоков из глубоководных выпусков. Он оперативный и менее затратный.

Так, выполнение комплексной съемки при помощи зонда «Кондор» с фиксацией концентрации ОВВ на участках расположения выпусков сточных вод г. Балаклавы и г. Севастополя при скорости судна 6–8 узлов и глубине зондирования 100 м занимает несколько часов.

К тому же метод, основанный на определении концентрации ОВВ, более информативен, так как дает представление о трехмерной структуре фактического поля взвеси, что позволяет проследить распространение этого вещества в водной толще. Наблюдения за красителем [3, 4] велись только на поверхности моря посредством аэрофотосъемки. В толще вод распространение взвеси моделировалось.

Заключение

На основе данных семи экспедиций, проведенных в 2008–2019 гг., проанализирована структура поля концентрации ОВВ и термохалинного поля на участках у южного берега Гераклейского полуострова, где расположены подводные выпуски сточных хозяйственно-бытовых вод г. Балаклавы (район 1) и г. Севастополя (район 2). Определены признаки присутствия сточных

хозяйственно-бытовых вод. Оценен масштаб антропогенного воздействия каждого из рассмотренных источников на окружающую среду. Рассмотрено влияние фоновой стратификации на распространение сточных вод из придонного слоя к поверхности моря.

Показано, что в каждом из исследованных районов в поле концентрации ОВВ сточные хозяйственно-бытовые воды проявляются в виде локальных максимумов с концентрацией, в разы и в десятки раз превышающей природную норму. Иногда эти воды обнаруживались в поле солёности в виде локальных минимумов.

В районе 1 расположение над сезонным термоклином коллектора сточных вод г. Балаклавы способствует свободному подъему антропогенной взвеси из придонного горизонта к поверхности моря в течение всего года.

В этом районе структура поля концентрации ОВВ отличалась стабильностью и в течение 2000–2018 гг. характеризовалась следующими свойствами. В поверхностном слое толщиной 3–7 м наблюдался локальный максимум 7.1–18.6 мг/л. Вся толща вод содержала антропогенную взвесь. Влияние коллектора распространялось на расстояние 0.4–0.6 мили от точки выпуска. Район 1 выделяется максимальной концентрацией ОВВ антропогенной природы по сравнению с другими открытыми участками и бухтами Севастопольского региона.

В районе 2 прослежена качественная зависимость распространения ОВВ антропогенной природы от стратификации вод. В ситуации, когда сезонный термоклин не сформирован (май 2016 г.), в поверхностном слое была обнаружена антропогенная взвесь, концентрация которой в разы и на порядок превосходила фоновые значения. При развитом сезонном термоклине (сентябрь 2016 г.) на преобладающей части акватории содержание ОВВ соответствовало природной норме. В августе 2019 г. в ситуации апвеллинга и развитого сезонного термоклина антропогенная взвесь наблюдалась в поверхностном слое вод на всей акватории полигона.

В районе 2 влияние сточных вод распространяется на расстояние 1–1.5 миль от места выпуска.

Результаты настоящего исследования, основанные на анализе структуры поля концентрации ОВВ, подтверждают выявленную ранее на базе других методов зависимость распространения канализационных стоков от фоновой стратификации вод для глубоководных выпусков в районе Крыма. Это позволяет применять использованный нами метод для исследования распространения канализационных стоков из глубоководных выпусков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Источники загрязнения прибрежных вод севастопольского района / В. М. Грузинов [и др.] // *Океанология*. 2019. Т. 59, № 4. С. 579–590. EDN VEOVBB. doi:10.31857/S0030-1574594579-590
2. *Eisma D. Suspended matter in the aquatic environment*. Berlin : Springer, 2011. 315 p. doi:10.1007/978-3-642-77722-6
3. Опыт теоретического экспериментального исследования проблемы глубоководного сброса сточных вод на примере района Ялты / В. И. Зац [и др.]. Киев : Наукова думка, 1973. 274 с.

4. Моделирование процессов самоочищения вод шельфовой зоны моря / Под ред. В. И. Заца, Г. А. Гольдберга. Ленинград : Гидрометеиздат, 1991. 230 с.
5. *Ломакин П. Д., Чепыженко А. А.* Гидрофизические условия и характеристика загрязнения вод бухты Казачья (Крым) в сентябре 2018 года // Системы контроля окружающей среды. 2019. № 1. С. 48–54. EDN ZDRMSD. doi:10.33075/2220-5861-2019-1-48-54
6. *Ломакин П. Д., Чепыженко А. И., Гребнева Е. А.* Поля гидрофизических и гидрохимических элементов в бухтах Южная и Корабельная (Крым) в декабре 2018 года // Системы контроля окружающей среды. 2019. № 3. С. 44–50. EDN VEWVVG. doi:10.33075/2220-5861-2019-3-44-50
7. *Ломакин П. Д., Чепыженко А. И.* Структура полей океанологических величин в зоне апвеллинга у Гераклеийского полуострова (Крым) в августе 2019 года // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 1. С. 31–41. EDN JCOWQH. doi:10.22449/2413-5577-2022-1-31-41
8. *Ломакин П. Д., Попов М. А.* Океанологическая характеристика и оценка загрязнения вод Балаклавской бухты. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. 220 с.
9. Структура и происхождение подводного плюма вблизи Севастополя / В. Г. Бондур [и др.] // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11, № 4. С. 42–54. EDN BLJAKG. doi:10.7868/S2073667318040068
10. *Бондур В. Г., Гребенюк Ю. В.* Дистанционная индикация антропогенных воздействий на морскую среду, вызванных заглубленными стоками: моделирование, эксперименты // Исследование Земли из космоса. 2001. № 6. С. 49–67. EDN TOYRSR.
11. *Дулов В. А., Юровская М. В., Козлов И. Е.* Прибрежная зона Севастополя на спутниковых снимках высокого разрешения // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 6. С. 43–60. EDN VHEWWN.

Поступила 09.08.2023 г.; одобрена после рецензирования 19.10.2023 г.;
принята к публикации 27.12.2023 г.; опубликована 25.03.2024 г.

Об авторах:

Ломакин Павел Демьянович, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), доктор географических наук, профессор, **Researcher ID: V-7761-2017**, **SPIN-код: 5419-9884**, p_lomakin@mail.ru

Чепыженко Алексей Ильич, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), кандидат технических наук, **SPIN-код: 3599-9653**, ecodevice@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Ломакин Павел Демьянович – общее научное руководство исследованием, формулировка цели и задач; интерпретация результатов, написание текста статьи

Чепыженко Алексей Ильич – проведение экспедиционных исследований, обработка и анализ данных, оформление графического материала, интерпретация результатов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.